



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 41 18 973 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁵:
H 01 J 37/32
H 05 H 1/46
C 23 F 4/04

②1 Aktenzeichen: P 41 18 973.6
②2 Anmeldetag: 8. 6. 91
④3 Offenlegungstag: 10. 12. 92

DE 41 18 973 A 1

⑦1 Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung eV, 8000 München, DE

⑦4 Vertreter:

Münich, W., Dipl.-Phys. Dr.rer.nat., Pat.-Anw.;
Steinmann, O., Dr., Rechtsanwalt, 8000 München

⑦2 Erfinder:

Heinrich, Friedhelm, Dipl.-Phys.; Hoffmann, Peter,
Dipl.-Phys., 1000 Berlin, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Vorrichtung zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten

⑤7 Beschrieben wird eine Vorrichtung zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten, mit einem Rezipienten, in dem im Plasma gebildete Ionen und reaktive Neutralteilchen (Radikale) auf das Substrat einwirken.
Die Erfindung zeichnet sich dadurch aus, daß zur Steuerung der Absolutwerte der Ionen- und Radikalenstromdichten und zur Steuerung der relativen Verhältnisse von Ionen- zu Radikalenstromdichten auf der Oberfläche des Substrats Mittel zur Variation des Plasmavolumens vorgesehen sind.

DE 41 18 973 A 1

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten, mit einem Rezipienten, in dem im Plasma gebildete Ionen und reaktive Neutralteilchen (Radikale) auf das Substrat einwirken.

Derartige Vorrichtungen zur plasmaunterstützten Bearbeitung werden sowohl zum Abtragen als auch zum Auftragen von Material von bzw. auf Halbleiter-, Metall, Glas- oder Kunststoffsubstrate verwendet.

Der in derartigen Vorrichtungen durchgeführte Bearbeitungsvorgang beruht auf einem kombinierten Angriff der im Plasma gebildeten Ionen und der reaktiven Neutralteilchen (Radikale). Während die Neutralteilchen im wesentlichen mit thermischer Geschwindigkeit und mit isotroper Richtungsverteilung auf das Substrat (Wafer) auftreffen, erreichen die Ionen den Wafer mit relativ hoher kinetischer Energie und starker Vorzugsorientierung.

Aus einer Reihe von Veröffentlichungen ist es bekannt, bei plasmaunterstützten Bearbeitungsvorgängen, wie z. B. beim Trockenätzen oder bei der Schichtabscheidung zusätzlich Magnetfelder zu verwenden. Nur exemplarisch wird dabei auf die Veröffentlichungen "Magnetically Enhanced Plasma Deposition and Etching" in Solid State Technology, April 1987, S.99 – 104, "A magnetic multipole reactor for high-flux reactive ion etching" in J.Appl. Phys. 63(6), S.1899 – 1903, "RF-broad-beam ion source for reactive sputtering" in Vacuum, 1986, S. 973 – 976 verwiesen.

Bei diesen bekannten Vorrichtungen werden die Magnetfelder mit dem Ziel verwendet, die Elektronen möglichst lange im Plasma zu halten und damit deren Dichte und Stoßwahrscheinlichkeit zu erhöhen. Auf diese Weise erreicht man eine Erhöhung der Ionenproduktion sowie eine gewisse Erhöhung der Radikalenproduktion.

Erfindungsgemäß ist nun erkannt worden, daß bei Vorrichtungen zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten, mit einem Rezipienten, in dem im Plasma gebildete Ionen und reaktive Neutralteilchen (Radikale) auf das Substrat einwirken, das Bearbeitungsergebnis nicht nur von den Absolutwerten der Ionen- und Radikalenstromdichten auf der Oberfläche des Substrats, sondern auch vom Verhältnis r von Ionen- zu Radikalenstromdichten $r = j_{\text{ion}}/j_{\text{rad}}$ bestimmt wird.

Bei den bekannten Vorrichtungen zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten, mit einem Rezipienten, in dem im Plasma gebildete Ionen und reaktive Neutralteilchen auf das Substrat einwirken, wie sie beispielsweise aus den vorstehend genannten Druckschriften bekannt sind, ist eine gezielte Einstellung der Ionen- und Radikalenstromdichten nicht möglich.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten, mit einem Rezipienten, in dem im Plasma gebildete Ionen und reaktive Neutralteilchen (Radikale) auf das Substrat einwirken, anzugeben, bei der die Ionen- und Radikalenstromdichten weitgehend unabhängig voneinander einstellbar sind.

Eine erfindungsgemäße Lösung dieser Aufgabe ist im Anspruch 1 angegeben. Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Erfindungsgemäß wird eine Vorrichtung zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten dadurch weitergebildet, daß zur Steuerung der Absolutwerte der Ionen- und Radikalenstromdichten und zur Steuerung der relativen Verhältnisse von Ionen- zu Radikalen-

stromdichten auf der Oberfläche des Substrats Mittel zur Variation des Plasmavolumens vorgesehen sind.

Die Erfindung geht von dem Grundgedanken aus, durch eine gezielte Variation des Plasmavolumens beispielsweise durch den Einsatz bestimmter Magnetfeldkonfigurationen oder der Rezipientengeometrie die einzelnen Stromdichten einzustellen.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung ermöglicht damit eine Erhöhung der Absolutstromdichten von Ionen und Radikalen (chemisch reaktiven Neutralteilchen) sowie eine kontrollierte Einstellung der Stromverhältnisse r .

Die Erfindung wird nachstehend ohne Beschränkung des allgemeinen Erfindungsgedankens anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung exemplarisch beschrieben, auf die im übrigen bezüglich der Offenbarung aller im Text nicht näher erläuterten erfindungsgemäßen Einzelheiten ausdrücklich verwiesen wird. Es zeigen:

Fig. 1 eine Darstellung zur Erläuterung der der Erfindung zugrundeliegenden Prinzipien,

Fig. 2a bis 2c Varianten eines ersten Ausführungsbeispiels,

Fig. 3 ein zweites Ausführungsbeispiel, und **Fig. 4** ein drittes Ausführungsbeispiel.

Fig. 1 zeigt zur Erläuterung der Grundprinzipien eine Vorrichtung zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten, die einen Rezipienten 1, beispielsweise eine zylindrische Kammer aufweist. In dem Rezipienten 1 ist eine Elektrode K angeordnet, die über ein Anpassungsnetzwerk 2 mit einer Hochfrequenz-Leistungsquelle 3 verbunden ist. Mit A sind eine Gegenelektrode und mit Sb das zu bearbeitende Substrat bezeichnet.

Bei den in **Fig. 1** dargestellten Vorrichtungen, wie sie aus dem Stand der Technik bekannt sind, stellen sich i. a. sowohl das Plasmavolumen als auch die Stromdichten j der Ionen und Radikalen in Richtung auf das Substrat Sb je nach Wahl der Prozeßbedingungen (z. B. Reaktor-geometrie, Prozeßdruck, Gasfluß, eingekoppelte Leistung) mehr oder weniger selbsttätig ein.

Im folgenden sollen die Konsequenzen erläutert werden, die sich durch die erfindungsgemäß vorgesehene Variation des Plasmavolumens V_p für die Ionen- und Radikalenstromdichten auf das Substrat Sb ergeben.

Die Bilanzgleichung für die Produktions- und Verlusten werden durch die Kontinuitätsgleichung

$$\text{div } \vec{j} = P \quad (1)$$

beschrieben, wobei P die Produktionsrate für Ionen und Radikale im Plasmavolumen V_p und j die Stromdichte der aus einem Volumenelement abfließenden Teilchen bedeuten. Die Integration liefert bei im Plasmavolumen konstanter Produktionsrate P , wenn die Verluste im Volumen zunächst vernachlässigt werden,

$$\oint \vec{j} \cdot d\vec{A} = P \cdot V_p \quad (2)$$

wobei die Integration über die gesamte Plasmaoberfläche A_p läuft.

Bei der Integration der Gleichung (2) sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1) Bei kleinen Drücken bzw. hohen Leistungen wird sich das Plasma unabhängig von der speziellen Anordnung der Elektroden K und A auf nahezu das gesamte Kammervolumen $V_p = V$ ausdehnen. Für

Ionen- und Neutralteilchen sind die Verlustoberflächen in diesem Fall gleich der Kammeroberfläche A. Die Ionen- bzw. Radikalenstromdichten werden dann

$$j_{\text{ion}} = p_{\text{ion}} V/A \quad (3)$$

$$j_{\text{rad}} = p_{\text{rad}} V/A_{\text{rad}} \quad (4)$$

A_{rad} ist eine effektive Verlustoberfläche, die von der Geometrie und der Materialbeschaffenheit der Kammer sowie von der Pumpleistung abhängig ist.

2) Wird das Plasmavolumen V_p auf einen Bereich kleiner als das Kammervolumen V reduziert (dieser Fall ist mit dem Index r bezeichnet) dann gilt für die Ionenstromdichten bei konstantem P

$$j_{\text{ion}} = P_{\text{ion}} V_r/A_r \quad (5)$$

Für die neutralen Teilchen gilt die Beziehung

$$j_{\text{rad}} = P_{\text{rad}} V_r/A_{\text{rad}} \quad (6)$$

Diese Gleichung berücksichtigt, daß Neutralteilchen im wesentlichen an den Kammerwänden verlorengehen. A_{rad} ändert sich daher bei Reduzierung des Plasmavolumens nicht. Die Änderung der Ionenstromdichten folgt dann aus den Gleichungen (3) und (5), die der Radikalen, d. h. der reaktiven Neutralteilchen aus den Gleichungen (4) und (6).

Wenn man annimmt, daß sich die Produktionsraten für Ionen und Radikale vergleichbar verhalten, dann ergeben sich die Stromverhältnisse und deren Änderung a zu

$$a = (j_{\text{rion}}/j_{\text{rion}}) : (j_{\text{rad}}/j_{\text{rad}}) = A/A_r \quad (7)$$

d. h. die Stromverhältnisse ändern sich wie die Verhältnisse der für den Abtransport der Ionen verantwortlichen Plasmaoberflächen.

Bei einer Einschnürung des Plasmas, das im günstigsten Fall auf den Bereich der Elektroden K und A beschränkt ist, erhöht sich der Gesamtstrom auf die Substratoberfläche als Folge der Leistungsdichteerhöhung und der verminderten Wandverluste bei konstanter Gesamtleistung. Die Radikalenstromdichte erhöht sich nicht in dem selben Maße. Das Verhältnis $r = j_{\text{ion}}/j_{\text{rad}}$ der Stromdichten auf dem Substrat S_b erhöht sich um den Faktor A/A_r , wobei A die Gesamtoberfläche, die durch die Kammerwände und die Substratoberfläche bestimmt ist, und A_r die reduzierte Verlustoberfläche für die Ionen bedeuten.

Die reduzierte Verlustoberfläche A_r für die Ionen ist bei einer Einschnürung zwischen die Elektroden K und A (gestrichelter Bereich in Fig. 1) gleich der zweifachen Elektrodenoberfläche, da nach den Seiten keine Ionen abfließen können. Wird z. B. eine Kammer mit der Höhe $h_K = 20$ cm und mit dem Durchmesser $d_K = 50$ cm und ein Substrat mit einem Durchmesser $d_w = 20$ cm (8" Wafer) verwendet, dann ergibt sich eine Variationsbreite des Verhältnisses der Stromdichten von Ionen und Neutralteilchen von mehr als 20 (!) durch Steuerung des Plasmavolumens.

Dies ist insbesondere bei der anisotropen Strukturierung von Vorteil, bei der hohe Ionenstromdichten im Vergleich zu den Radikalenstromdichten erwünscht sind.

Im folgenden sollen Vorrichtungen zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten beschrieben werden, bei denen je nach Anwendung bzw. angestrebtem Verhältnis von Ionen- zu Radikalenstromdichten bestimmte Plasmavolumina bzw. -oberflächen durch geeignete Magnetfeld/Rezipientenkonfigurationen realisiert werden.

In den folgenden Figuren sind jeweils gleiche oder entsprechende Teile wie in Fig. 1 mit den selben Bezugszeichen bezeichnet, so daß auf eine erneute Vorstellung verzichtet wird, und lediglich die Abweichungen der in diesen Figuren dargestellten Ausführungsbeispiele gegenüber dem ersten Ausführungsbeispiel erläutert werden:

Die Fig. 2a bis 2c zeigen Varianten eines ersten Ausführungsbeispiels, bei dem der Anteil der positiven Ionenstromdichten erhöht wird. Hierzu sind Magnetfelder vorgesehen, die durch Elektromagnete Sp (Fig. 2a) oder durch sich gegenüberliegende Permanentmagnete erzeugt werden. Diese Konfiguration läßt sich mit besonderem Vorteil einsetzen, wenn der Anteil ioneninduzierter Oberflächenprozesse verstärkt werden soll, wie dies z. B. bei der anisotropen Strukturübertragung (Ätzen) oder der ioneninduzierten Deposition etc. der Fall ist.

Die Wirkung des durch die Magnete Sp hervorgerufenen Magnetfeldes (B-Feld) ist folgende:

Die Elektronendiffusion senkrecht zu den B-Feldlinien ist begrenzt, so daß auch die positiven Ionen mit verminderten Stromdichten in dieser Richtung austreten. Dadurch werden bei ausreichend hohen B-Feldern die Elektronen und damit auch die Ionen im reduzierten Volumen V_r gehalten. Durch eine Variation des Magnetfeldes B , z. B. durch Veränderung der Spulenströme oder der verwendeten Permanentmagnetanordnung, läßt sich V_r und damit das Verhältnis r von Ionen- zu Radikalenstromdichten einstellen. Die maximal einstellbaren Stromdichteverhältnisse r sind — wie bereits ausgeführt — durch die Substratoberflächen bestimmt.

Die Einschnürung des Plasmas wird bei dem in Fig. 2a gezeigten Ausführungsbeispiel durch konzentrisch zu den Elektroden K und A angebrachte Spulen Sp erreicht. Verwendet man z. B. Spulen in Helmholtzkonfiguration, so erhält man im gesamten Plasmabereich eine homogene B-Feldverteilung. Die Magnetfeldlinien stehen senkrecht auf den Elektroden(Substrat)oberfläche. Dadurch wird die radiale Diffusion behindert. Je nach eingestellter Magnetfeldstärke kann so das Plasmavolumen verändert werden.

Ferner ist es möglich, den Abstand Ab der Elektroden K und A zu variieren. Hierdurch ergibt sich eine zusätzliche Variation der Plasmazusammensetzung und der Ströme.

Insbesondere läßt sich durch eine Verringerung des Elektrodenabstandes die Leistungsdichte im Plasmavolumen bei konstanter eingespreister Gesamtleistung sehr stark steigern. Das Plasma kann durch die magnetischen Felder auch bei hohen Leistungsdichten und kleinen Drücken (!) zwischen den Elektroden gehalten werden.

Ausdrücklich wird darauf hingewiesen, daß es nicht von Belang ist, wie die Magnetfelder erzeugt werden.

Wie Fig. 2b zeigt, kann das gleiche Ergebnis z. B. auch durch in die Elektroden integrierte Permanentmagneten N und S und/oder Spulen Sp , die konzentrisch zur eingezeichneten Achse sind, mit Magnetfeldlinien wie dargestellt, erzielt werden.

Der grundsätzliche Aufbau der in Fig. 2b dargestellten Variante in ähnlich dem in Fig. 2a. Der Unterschied

besteht darin, daß keine speziell geformte Gegenelektrode A vorhanden sein muß. Hier dient die gesamte Kammer 1 als Gegenelektrode. Das minimal einstellbare Plasmavolumen wird durch den Wirkungsbereich des Magnetfeldes bestimmt, der z. B. bei Verwendung von Magnetfeldspulen SP durch deren Durchmesser d_1 oder durch den Durchmesser d_2 der Permanentmagneten N und S variiert werden kann.

Fig. 2c zeigt, daß zusätzlich zu dem in den Fig. 2a und 2b dargestellten Aufbau Magnetfelder verwendet werden können, die parallel zur Oberfläche des Substrats S_b verlaufen. Hierdurch kann die Elektronen- und damit auch die Ionenbewegung auf das Substrat zusätzlich beeinflusst werden.

Die Durchmesser der in den Fig. 2a und 2c verwendeten Spulen Sp können in weiten Bereichen variiert werden. Die Spulendurchmesser können z. B. sehr viel größer sein als die Abmessungen der Kammer 1. Auch müssen die Spulenpaare nicht notwendigerweise konzentrisch zu den Kammer- und/oder Elektrodenachsen sein. In der Regel wird man jedoch bestrebt sein, homogenen Magnetfelder zwischen den Elektroden K und A zu haben. Dazu bieten sich Spulenpaare in Helmholtz-Konfiguration (Spulendurchmesser = Abstand zwischen den Spulen) an.

Selbstverständlich ist es aber auch möglich, anstelle von Spulen Permanentmagnete zu verwenden.

Fig. 3 zeigt ein zweites Ausführungsbeispiel, bei dem die Plasmaeinschnürung die relative Radikalenstromdichte, d. h. die relative Stromdichte der reaktiven Neutralteilchen erhöht.

Bei diesem Ausführungsbeispiel verlaufen die Magnetfeldlinien parallel zur Oberfläche des Substrats S_b , so daß die Ionenstromdichten zum Substrat reduziert werden. Der relativ steigende Radikalenanteil fördert die rein chemische Komponente bei der Oberflächenbearbeitung, z. B. für die Erzeugung isotroper Ätzprofile, für die thermische Ablagerung (Deposition) von Schichten auf das Substrat, etc.

Die Leistungseinspeisung erfolgt außerhalb der Substratelektrode durch eine seitlich angebrachte Elektrode E. Durch Einführung eines variablen Magnetfeldes können die Beweglichkeit von Elektronen in Richtung auf das Substrat S_b und damit die Ionenströme auf das Substrat vermindert werden. Die Ionenstromdichten können so kontinuierlich eingestellt werden. Bei geeigneten hohen B-Feldern kann der Ionenstrom auf das Substrat vollständig unterdrückt werden, so daß ausschließlich neutrale Teilchen das Substrat erreichen können.

Fig. 4 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel, das eine Kombination des ersten und zweiten Ausführungsbeispiels darstellt. Dies erlaubt eine größere Variationsbreite in der Prozeßführung von Ionen- zu neutralteilchendominierter Oberflächenbehandlung.

Die Leistungseinkopplung kann über die Substratelektrode K bzw. über eine seitlich angebrachte Elektrode E erfolgen. Eine Umschaltung der Leistungseinkopplung bzw. eine Aufteilung auf die beiden Elektroden ist ebenfalls möglich.

Weiterhin können auch variable Elektrodenabstände für eine zusätzliche Beeinflussung der Plasmaeigenschaften sorgen.

teilchen (Radikale) auf das Substrat einwirken, dadurch gekennzeichnet, daß zur Steuerung der Absolutwerte der Ionen- und Radikalenstromdichten und zur Steuerung der relativen Verhältnisse von Ionen- zu Radikalenstromdichten auf der Oberfläche des Substrats Mittel zur Variation des Plasmavolumens vorgesehen sind.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Variation des Plasmavolumens die Konfiguration des Rezipienten ändern.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Mittel zur Variation des Plasmavolumens Magnetanordnungen sind, die ein Magnetfeld erzeugen.

4. Vorrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erhöhung des Anteils der positiven Ionenstromdichten die Magnetanordnung ein Magnetfeld erzeugt, dessen Feldlinien in etwa senkrecht zur Oberfläche des Substrats verlaufen.

5. Vorrichtung nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, daß zur Erhöhung der relativen Radikalenstromdichte die Magnetanordnung ein Magnetfeld erzeugt, dessen Feldlinien parallel zur Oberfläche des Substrats verlaufen, so daß die Ionenstromdichten zum Substrat reduziert werden.

6. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetanordnung eine Helmholtz-Konfiguration aufweist.

7. Verwendung einer Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6 zum Trockenätzen oder Beschichten.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur plasmaunterstützten Bearbeitung von Substraten, mit einem Rezipienten, in dem im Plasma gebildete Ionen und reaktive Neutral-

— Leerseite —

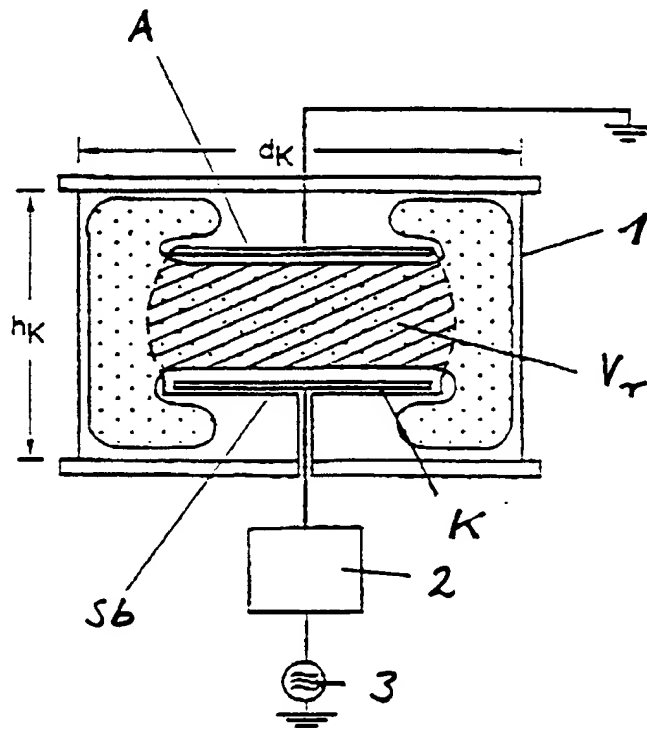


Fig. 1

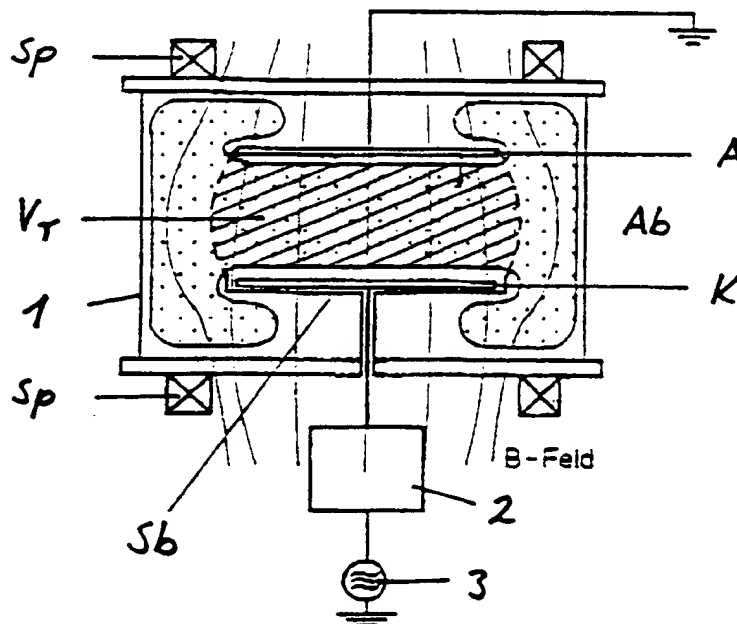


Fig. 2a

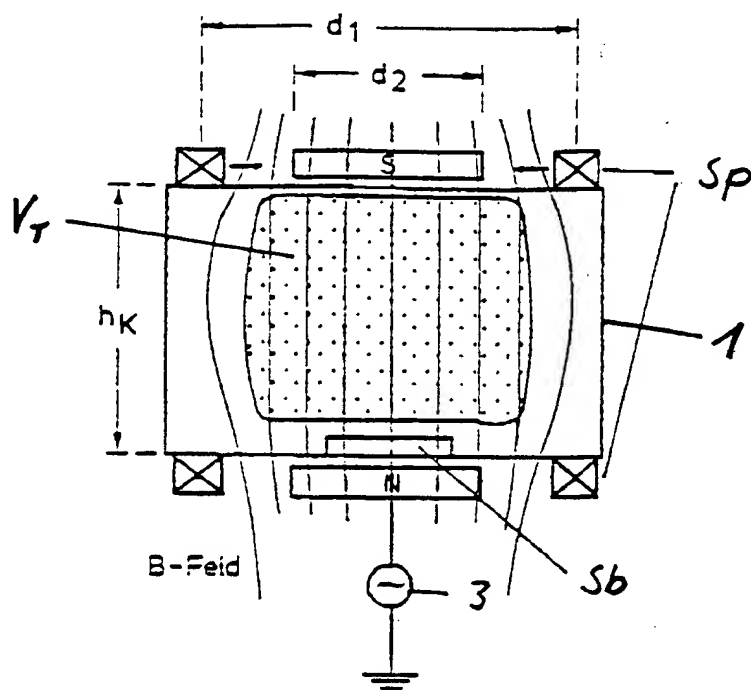


Fig. 26

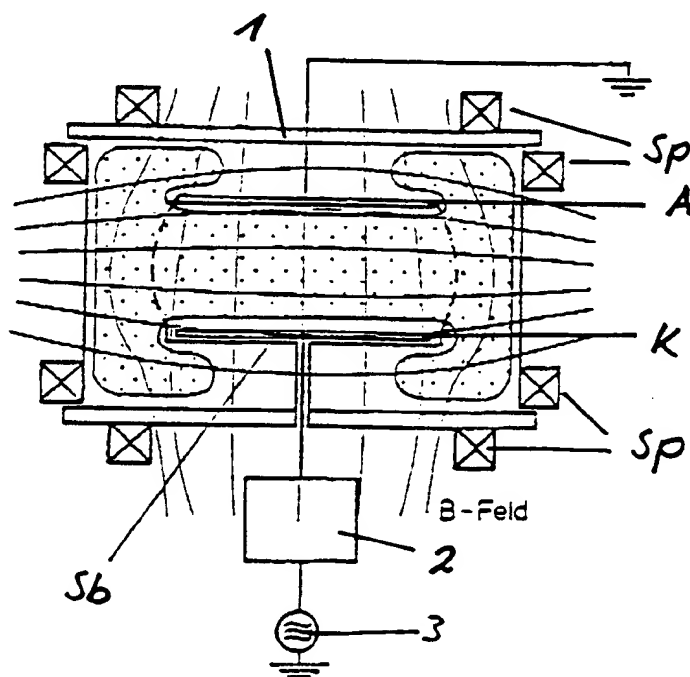


Fig. 2c

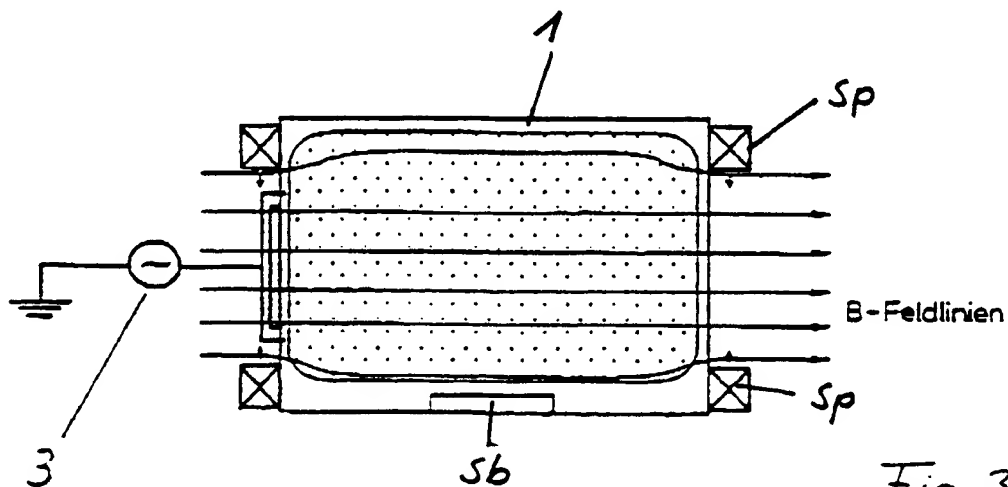


Fig. 3

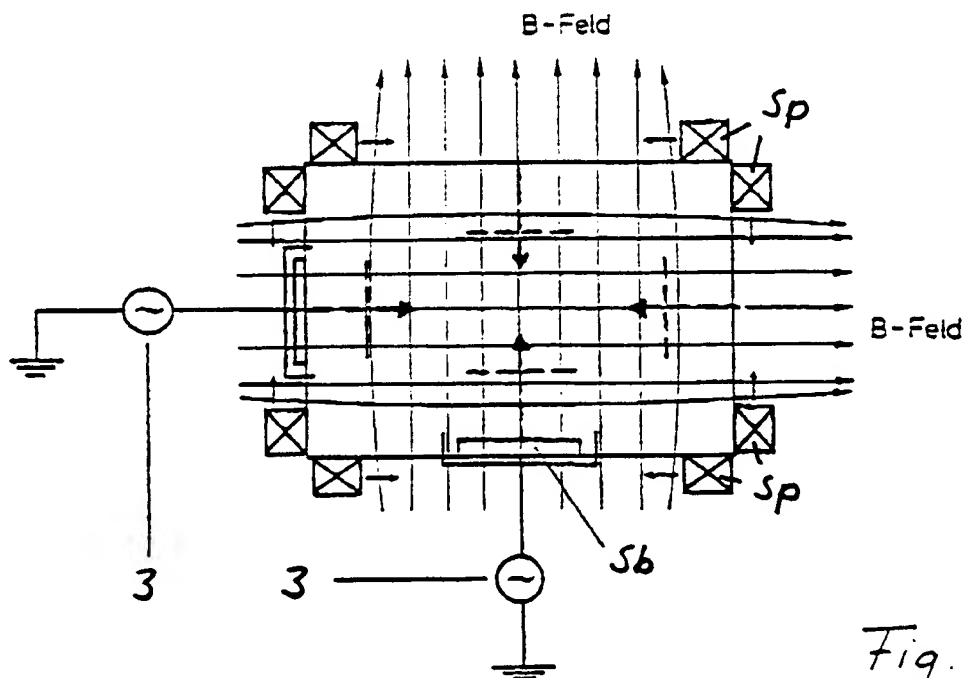


Fig. 4